Actualización de los criterios de operación durante crecidas normales y extraordinarias de los embalses en cadena del río Negro (Uruguay)

Ing. Julio Patrone
Sub-Gerente Ingeniería de Presas y Embalses

Ing. Alvaro Plat
Supervisor Técnico de Presas y Embalses

Ing. Guillermo Failache
Ingeniero civil de Presas y Embalses, Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) – Montevideo, Uruguay

RESUMEN: Durante 1997 y 1998 a través de una consultoría con la firma italiana ISMES, se actualizaron los estudios hidrológicos utilizados por UTE en el sistema integrado de los embalses del río Negro. El estudio consideró las nuevas series históricas de datos hidrológicos e incluyó la aplicación de modernas herramientas para el procesamiento y la modelación de los fenómenos físicos asociados a las crecidas.

Como principales temas del estudio se consideran: la elección de la metodología para la determinación de las máximas crecidas probables utilizando tanto métodos estadísticos como determinísticos (cálculo de Precipitación Máxima Probable y Crecida Máxima Probable), obtención de los hidrogramas de máxima crecida probable para las tres Presas ("Dr. Gabriel Terra", "Rincón de Baygorria" y "Constitución") y gastos máximos asociados con las diferentes variables hidrometeorológicas. A partir de la elaboración de un modelo matemático hidrológico para simular los distintos escenarios y la evacuación de las distintas crecidas por los aliviaderos, se obtuvo un programa de operación de compuertas a utilizar en caso de ocurrencia de eventos extremos. Se efectuaron recomendaciones para optimizar el Servicio de Previsión de Crecidas. Se realizó la reevaluación de la capacidad de descarga de los órganos de evacuación en función de los caudales máximos y de la seguridad estructural de las obras constitutivas de las presas principales y sus diques auxiliares en situación de crecida extrema en función de los resultados hidrológicos e hidráulicos obtenidos. Finalmente se elaboraron mapas de inundación de las zonas afectadas aguas abajo de las tres Presas para los casos de crecida extrema normal y extraordinaria y recomendaciones a ser tenidas en cuenta en los planes de contingencia.

En el presente trabajo se presenta una descripción de los principales aspectos metodológicos y las herramientas utilizadas en cada etapa del estudio, así como también sus conclusiones más importantes.

1 INTRODUCCION

La República Oriental del Uruguay con una superficie terrestre de 176215 km^2, limita al sur con el Río de la Plata y el Océano Atlántico, al oeste con la República Argentina y al noreste con la República Federativa del Brasil. La topografía es en general plana, existiendo pocas elevaciones. Tiene una densa red de cursos de agua, siendo el río Negro el mayor de los que atraviesan su territorio. El río Negro nace en la República Federativa del Brasil, en el estado de Río Grande del Sur a 50 km al norte de la frontera con la República Oriental del Uruguay. Tiene una extensión total de 850 km y un desnivel total de 140 m, siendo sus afluentes principales el río Tacuarembó y el arroyo Salsipuedes en la zona norte y el río Yi y el arroyo Grande del Sur en la zona Sur. La cuenca total del río Negro es de 71400 km^2, poco más de la tercera parte de la superficie del país, siendo 3125 km^2 correspondientes al territorio comprendido en la República Federativa del Brasil. La precipitación media anual en la cuenca del río Negro es de 1200 mm. El aprovechamiento hidroeléctrico del río Negro a partir del potencial hidráulico de su cuenca, es una de las mayores fuentes de generación de energía eléctrica de la República Oriental del Uruguay. El mismo lo integran



Figura 1.

tres saltos hidráulicos artificiales: en primer lugar la Presa y central Hidroeléctrica "Dr. Gabriel Terra", aguas abajo la Presa y Central Hidroeléctrica "Rincón de Baygorria" y finalmente la Presa y Central Hidroeléctrica "Constitución".

Se presenta a continuación un mapa (Figura 1) de la cuenca con la ubicación de las tres presas.

2 INFORMACIÓN DE BASE

Para la elaboración del estudio se utilizó la siguiente información:

- Datos de lluvia en la cuenca: desde 1912 hasta 1997 (192 estaciones pluviométricas en total).
- Datos de operación de las tres Centrales: desde su respectiva puesta en marcha (año 1945 para Terra, 1960 para Baygorria y 1982 para Constitución) hasta 1997.
- Datos de niveles de embalse: ídem anterior.

En particular para la determinación de la Precipitación Máxima Probable se utilizó la siguiente información:

- Selección de cinco grandes tormentas ocurridas en la cuenca de diez días de duración aproximada.
- Información meteorológica horaria completa de seis estaciones ubicadas dentro y en las cercanías de la cuenca del río Negro disponible en cada tormenta.
- Para las estaciones meteorológicas: series históricas de valores máximos anuales de punto de rocío persistente durante 12 horas para el semestre marzo–agosto.
- Información de los niveles superiores de la atmósfera obtenida de los radiosondeos diarios de la Estación Ezeiza (República Argentina) para los eventos seleccionados.

3 MODELOS DE MÁXIMAS CRECIDAS Y DE GESTION DE EMBALSES

Para la realización de este estudio de máximas crecidas se utilizaron dos modelos matemáticos: en primer lugar un modelo precipitación-escorrentía y en segundo, un modelo de simulación de embalses.

Modelo precipitación-escorrentía

El sistema utilizado por ISMES, denominado "HYDRA", requirió la construcción de un modelo digital del terreno ("DEM": Digital Elevation Model) de la cuenca total del río Negro hasta la Presa Constitución. El DEM se obtuvo digitalizando de la cartografía del Servicio Geográfico Militar en escala 1:500.000 tanto las curvas de nivel como la red hidrográfica. De estos datos se ha obtenido por interpolación, una malla cuadrada en la que cada cuadrado representa una fracción del terreno con características homogéneas y con una cota determinada. Cabe destacar que el uso de este tipo de modelos basados en hidrología distribuída, no era aún de uso común en Uruguay. La elección del tamaño de malla surge de la evaluación de varios factores, entre los cuales se mencionan los principales: superficie de la cuenca, pendiente del terreno, variabilidad de los tipos de suelo superficiales, lo mismo para el tipo de vegetación, variabilidad en los campos de isoyetas de la región en estudio. Para la cuenca del río Negro, de características bastante homogéneas, se eligió como más adecuada una malla de celdas de 2 km de lado, pues mallas de lado más pequeño aumentaban significativamente los tiempos de cálculo sin obtener cambios significativos en los resultados hidrológicos.

Modelo de gestión de embalses

Se utiliza aquí la ecuación de continuidad hidráulica de un embalse con un intervalo de tiempo de 6 horas (Δt seleccionado como óptimo durante las simulaciones).

El caudal erogado por vertedero se considera como una relación lineal entre el nivel de embalse y las etapas, variando entre un nivel Hmin por debajo del cual el vertedero permanece cerrado y un nivel Hmax por encima del cual el vertedero se debe abrir en banda. Los valores Hmin y Hmax son variables dentro del sistema HYDRA y por lo tanto pueden ser modificados de acuerdo a la crecida que se esté analizando.

Se presenta a continuación una figura (Figura 2) que representa este tipo de curva de descarga en función del nivel.

Implementación del sistema HYDRA en la cuenca del río Negro

Los modelos matemáticos descriptos, precipitación-escorrentía y de gestión de embalses, fueron

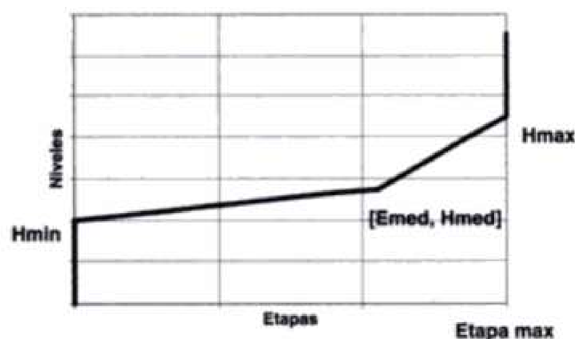


Figura 2.

implementados para la cuenca del río Negro a partir de los siguientes elementos:

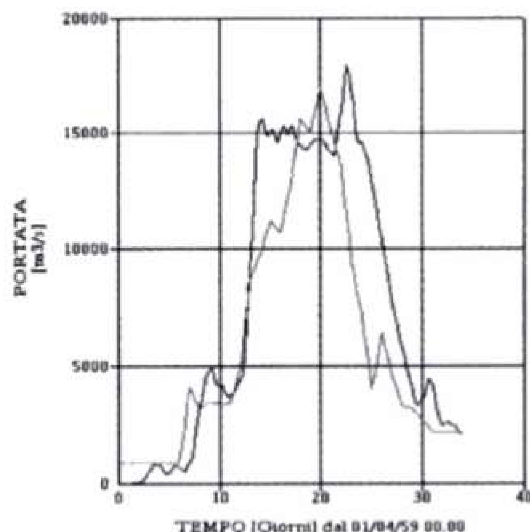


Figura 3.

1 Cinco subcuencas hidrográficas que simulan el comportamiento hidrológico de los aportes en correspondencia con los cierres en las tres presas. Las subcuencas del Tacuarembó, Alto Río Negro y Directa Lago Bonete, simulan en su conjunto los aportes a la Presa "Dr. Gabriel Terra". La subcuenca de Salsipuedes-Baygorria simula los aportes intermedios entre la Presa "Dr. Gabriel Terra" y "Baygorria". La subcuenca Durazno-Constitución simula los aportes intermedios entre las Presas de "Baygorria" y "Constitución", con la estrategia de cálculo asociada a cada una de ellas. La disposición de estas subcuencas, puede apreciarse en la Figura 1.
2 Cinco conjuntos de pluviómetros que representan adecuadamente la distribución de lluvias sobre cada una de las subcuencas.
3 Los tres embalses con la estrategia de simulación asociada.
4 Los registros de niveles de embalse y los caudales erogados por las tres presas.

Calibración de los modelos

La calibración de los modelos se realizó con datos posteriores a 1946, año de entrada en operación de la Presa "Dr. Gabriel Terra" y fue realizada con los datos de cinco crecidas históricas y validada con los datos de otras cinco crecidas. Se realizó una primera etapa de pre-calibración de los parámetros de los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía a partir de los aportes a los embalses y en una segunda etapa de calibración final se utilizaron los niveles de los embalses.

A modo de ejemplo (Figura 3), se presenta a continuación la comparación de los aportes simulados con el modelo al embalse de Terra y los estimados por UTE para la gran crecida de abril de 1959 que ha sido la mayor registrada.

Como se puede apreciar, los caudales obtenidos mediante simulación ajustan bastante bien a los calculados por UTE (que se basaban en estimaciones, dado que hubo sobrepaso de la Presa "Dr. Gabriel Terra" y fugas por pasajes laterales, lo cual determinó en años posteriores la sobrelevación de la Presa y sus diques auxiliares). De cualquier forma, y a pesar de existir una sobrestimación del volumen de la crecida, se observa que el valor del caudal máximo simulado es muy similar al estimado de 17000 m^3/s y que el desfasaje temporal es de solamente un día de retardo en los caudales simulados.

4 SIMULACIÓN DE MÁXIMAS CRECIDAS

El cálculo de los hidrogramas con probabilidades asociadas combinó procedimientos de simulación descriptos con anterioridad y conceptos probabilísticos. La metodología empleada se puede resumir en los siguientes pasos:

- Simulación hidrológica diaria de las cuencas.
- Determinación de la serie de hidrogramas máximos anuales simulados en correspondencia con los tres cierres para todas las lluvias disponibles en el sistema HYDRA (serie histórica de 90 años).
- Extrapolación estadística de los picos de los hidrogramas máximos anuales simulados.
- Extrapolación estadística de los volúmenes de los hidrogramas de las crecidas.
- Composición de los hidrogramas estadísticos para 100, 1000 y 10000 años de tiempo de recurrencia.

Precipitación Máxima Probable (PMP)

La PMP se define (Hansen et al. 1982), como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible, correspondiente a una determinada duración, sobre un área de tormenta dada, en una ubicación geográfica particular y en determinada época del año, sin tener en cuenta las tendencias climáticas de largo plazo.

La metodología empleada para el cálculo de la PMP se puede resumir en los siguientes pasos:

- Selección de cinco tormentas intensas. Se eligen las tormentas a analizar aplicando criterios hidrológicos (secuencias de máximos valores de caudales diarios en estaciones hidrométricas).
- Análisis de las tormentas:
  1. Trazado preliminar de los campos de precipitación en escala diaria y acumulada para los eventos seleccionados. Se efectúa con el propósito de detectar singularidades que podrían estar asociadas a la presencia de datos erróneos.
  2. Corrección de los datos supuestamente erróneos. Estos datos son reemplazados por valores interpolados en el campo analizado.
  3. Trazado de los campos definitivos de precipitación para cada evento.
- Maximización por punto de rocío. Se utilizó la información de las estaciones meteorológicas disponibles (3 en Uruguay y 2 en Argentina).
- Estimación de la tormenta máxima. Se considera la tormenta que, una vez maximizada, produzca el mayor volumen precipitado. Para la misma se determina, en escala diaria, los valores de precipitación en los puntos de interés para la modelación hidrológica y se trazan las curvas altura-área-duración.
- Trazado de las curvas altura-área-duración de la tormenta máxima (Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation, WMO). Se efectúa por cálculo de áreas entre isoyetas en los campos analizados, se seleccionan duraciones de 24, 48, 72, etc. horas y se trazan las curvas correspondientes a la tormenta para diferentes duraciones en función de la altura de la precipitación y el área.

Se presentan a continuación las curvas alturas-duración-área correspondiente a la precipitación máxima probable resultante del estudio (Figura 4).

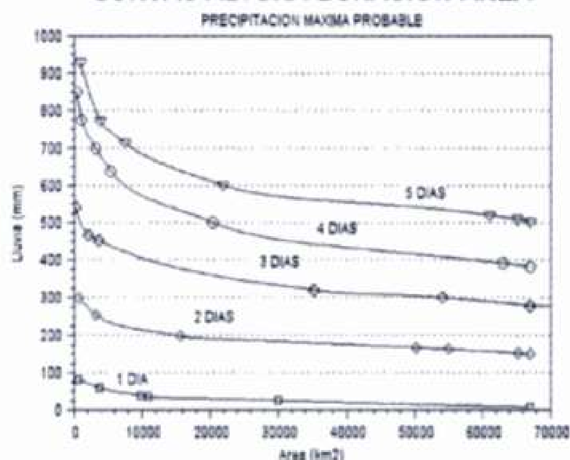


Figura 4.

Crecida Máxima Probable (PMF)

La metodología adoptada para la determinación de la PMF fue la siguiente:

- Determinación de varias posiciones posiblemente más desfavorables para el evento de la PMP.
- Cálculo de los niveles alcanzados para cada embalse.
- Elección del máximo nivel calculado.
- Elección del hidrograma correspondiente al máximo nivel calculado (PMF).

5 MODELO DE GESTION DEL SISTEMA DE EMBALSES ANTE CRECIDAS

Para la simulación de la gestión del sistema de embalses, se desarrolló un modelo matemático-hidrológico que simula la gestión de las tres Presas ante los eventos caracterizados por diversos tiempos de retorno (considera hidrogramas de crecida estadísticos) y ante el evento de la PMF.

Con el auxilio de este modelo se analizaron:

1. La evacuación de las crecidas estadísticas y PMF por los aliviaderos.
2. La adecuación de los órganos de evacuación existentes.
3. El programa de operación óptimo ante grandes crecidas, que permite laminarlas manteniendo las condiciones de seguridad de las estructuras y al mismo tiempo, conservar a la finalización de los eventos los máximos niveles de operación en los embalses para crecidas de tiempo de retorno hasta 10.000 años.
4. Niveles máximos de operación en los tres embalses.

Se presenta a continuación el resultado de la simulación de la crecida decamilenaria para la Presa Dr. Gabriel Terra mostrando el hidrograma de ingreso y los caudales erogados (Figura 5).

Del análisis y la reevaluación efectuadas acerca de la capacidad de descarga de los aliviaderos en las condiciones críticas (crecida decamilenaria), surgen

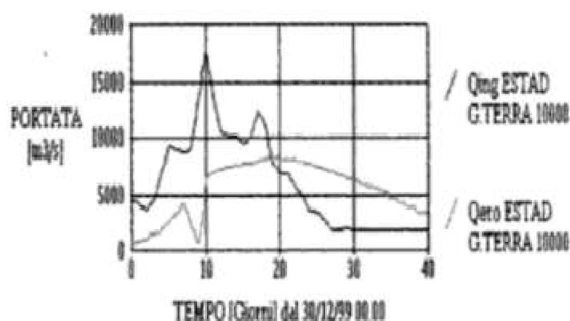


Figura 5.

que no son necesarias adecuaciones en dichas obras desde el punto de vista de su funcionamiento hidráulico. Los aliviaderos de las tres Presas están en condiciones de operar con seguridad y de acuerdo a las descargas previstas aún en las condiciones más exigentes. La crecida decamilenaria constituye el evento extremo para proyectos nuevos en Europa, donde en el pasado se consideraba razonablemente seguro el desagüe de crecidas de tiempo de retorno de 1000 años, y es el que se adoptó como criterio hidrológico de verificación en el estudio. Las tres presas no son capaces de evacuar, sin importantes desbordes la PMF. En efecto este limite superior fue calculado por primera vez para el conjunto del sistema de embalses y determinó que fundamentalmente las Presas de Baygorria y Constitución se verían largamente desbordadas.

6 REEVALUACION DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE LAS OBRAS

En esta etapa se analizaron las condiciones de seguridad estructural de cada una de las tres presas en función de los niveles hidrostáticos obtenidos sobre la base del análisis estadístico de los caudales para un tiempo de retorno de 10.000 años.

Los cálculos representaron una actualización de las verificaciones estructurales efectuadas en la fase de proyecto de cada una de las presas.

Criterios para el análisis estático

En la determinación de las condiciones de seguridad de las presas y en la definición de las eventuales acciones a llevar a cabo, fueron considerados los siguientes escenarios:

- No se considera aceptable la condición de desborde de las obras, tanto para las presas de tierra como las de hormigón.
- Para las presas de hormigón se considera aceptable que el nivel máximo de aguas arriba pueda coincidir con la cota de coronamiento de la presa.
- Para las presas de tierra se considera aceptable que el nivel máximo de aguas arriba pueda coincidir con la cota superior del núcleo impermeable interno de la presa.
- Se considera aceptable la reducción de la revancha por aguas abajo hasta un valor cero y eventualmente también la superación de la cota máxima de aguas abajo desde el punto de vista de la seguridad estática de las obras. En tal caso se deben considerar las protecciones adecuadas para cada central.

La crecida con tiempo de retorno 10.000 años no provoca variaciones significativas de los actuales factores de estabilidad estructural para ninguna de las tres presas debido a los aumentos, relativamente modestos de los niveles hídricos aguas arriba y aguas debajo de las estructuras respecto a los previstos por los proyectistas y no provocan desborde de las presas aún reduciendo o anulando las revanchas previstas.

7 AREAS INUNDABLES AGUAS ABAJO DE LAS PRESAS

En este estudio se trazaron los mapas de inundación del Río negro para los tramos de río ubicados aguas abajo de las tres presas, entendiendo como tramo el que va desde cada presa hasta el inicio del lago de la presa aguas abajo; en el caso de la presa Constitución es el comprendido entre la misma y la Ciudad de Villa Soriano.

Para cada uno de los tramos del río fueron analizadas dos situaciones:

- una que representa una crecida máxima normal para la cual fue adoptado un período de retorno de 100 años
- y una que representa una crecida máxima extrema para la cual se adoptó un período de retorno de 10000 años.

Los niveles para el trazado de los mapas fueron obtenidos calculando un perfil de régimen permanente con caudal igual a la envolvente de los máximos caudales de crecidas. De esta forma se trazaron los Mapas de Uniforme Probabilidad de Inundación.

La probabilidad asociada a un mapa determinado se hace coincidir con el tiempo de retorno del caudal que produce los niveles en el río utilizados para el trazado del mismo mapa. Para pasar del caudal de crecida a los niveles de referencia para el trazado de los mapas se utilizó un modelo atemático, considerando como condición hidráulica en el curso de agua un estado de régimen permanente, dado que las ondas de crecidas naturales pueden ser consideradas como sucesiones de estados de régimen permanente.

Del análisis de los mapas de áreas de inundación por efecto de las dos crecidas anteriormente mencionadas resulta que la extensión de estas áreas es notable debido a la particular conformación del territorio. Entre los efectos macroscópicos se señalan grandes remansos en los valles laterales en la desembocadura de los afluentes.

Los puntos que merecieron una mayor atención desde el punto de vista del riesgo hidráulico y de la protección civil son naturalmente los correspondientes a las ciudades de Paso de los Toros aguas abajo de la presa Dr. G. Terra y la ciudad de Mercedes aguas abajo de Constitución.

8 CONCLUSIONES

Desde que se proyectó el primer gran aprovechamiento hidroeléctrico en el Uruguay en la década de 1930 (Presa "Dr. Gabriel Terra"), nunca ha sido ignorada por parte de UTE la responsabilidad que implica la operación de una obra de estas características. Ya en abril de 1959, apenas 14 años después de entrar en operación la primer turbina de la Central, se debió gestionar una crecida con un tiempo de retorno superior a los 5000 años para la cuenca vertiente a dicha presa. Posteriormente, UTE encaró en la década del 60, una serie de estudios de actualización de las máximas crecidas en la cuenca del río Negro dada la magnitud de la ocurrida en 1959 y por otra parte, la implantación de su segundo escalón en el aprovechamiento del río Negro: la Presa "Rincón de Baygorria". Entre los estudios realizados, merecen destacarse especialmente los formulados por la firma francesa SOFRELEC, cuyas recomendaciones fueron llevadas a cabo por las sucesivas administraciones de la empresa. El esquema se completa hacia 1981, con la entrada en operación de la Presa "Constitución", que constituye el tercer y último proyecto en el aprovechamiento del río Negro.

Transcurridos más de 30 años de vigencia de dichos estudios, UTE entendió conveniente realizar un nuevo análisis de las crecidas máximas probables del río Negro, actualizando y complementando los anteriores a partir de la nueva serie de datos disponibles (30 años más extensa). Este nuevo estudio fue contratado con la firma italiana ISMES, desarrollado entre 1997 y 1998 y del mismo se han presentado en este trabajo, los principales aspectos metodológicos. Como conclusiones más importantes del estudio pueden mencionarse:

- Para la Presa "Dr. Gabriel Terra": la ocurrencia de una crecida decamilenaria se correspondería con un caudal máximo de aporte al embalse de 18000 m^3/s y un caudal erogado máximo de 8300 m^3/s. Para esta probabilidad de ocurrencia (1 en 10000 años), la Presa no enfrenta problemas de seguridad.
- Para la Presa "Rincón de Baygorria", la ocurrencia de una crecida decamilenaria se correspondería con un caudal máximo de aporte al embalse de 11000 m^3/s y un idéntico caudal máximo erogado, dado que el embalse no tiene capacidad alguna de regulación. Se ha verificado que para este evento extremo tampoco existe afectación de la seguridad de la obra.
- Para la Presa "Constitución", la crecida decamilenaria se correspondería con un caudal máximo de aporte al embalse de 24000 m^3/s y un caudal erogado máximo de 21000 m^3/s. Se ha verificado que las estructuras son, aún en este caso, globalmente estables y con márgenes apropiados de seguridad.
- Para las tres obras, se ha reevaluado la capacidad de descarga de los respectivos aliviaderos para el caso de crecida decamilenaria, de lo que surge que no son necesarias adecuaciones de los mismos. Los aliviaderos de las tres presas están en condiciones de operar con seguridad de acuerdo a las descargas previstas para esta condición extrema.

9 IMAGENES DE LAS TRES PRESAS



Presa "Dr. Gabriel Terra"



Presa "Rincón de Baygorria"



Presa "Constitución"

REFERENCIAS

1. **Estudio de máximas Crecidas del río Negro:** realizado con la firma ISMES (1998) (Ing. Morando Dolcetta Capuzzo, Ing. Sergio Menajovsky, Ing. Julio Alterach, Lic. Irene Obertello, Lic. Mario Bidegain, Ing. Leonardo Mancusi, Ing. Federico Bavestrello e Ing. Alberto Masera).
2. **Asesoramiento en Auscultación e instrumentación de Grandes Presas.** ISMES (1995).
3. **Informe hidrológico. Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Negro**. SOFRELEC. (1962).
4. **Estudio de las Obras Complementarias en "Rincón del Bonete" para la Evacuación de las Crecidas.** SOFRELEC (1964).

(5) **Anteproyecto de Palmar – Memoria.** SOFRELEC (1963).